



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Martin Kõks

**HARVENDUSRAIE VAJADUSE HINDAMINE
AEROLIDARI ANDMETELT LAEVA KATSEALAL**

**ESTIMATION OF THINNING NECESSITY IN LAEVA
TEST SITE USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA**

Magistritöö
Metsatööstuse õppekava

Juhendajad doktorant Tauri Arumäe, MSc

dotsent Mait Lang, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Martin Kõks		Õppekava: Metsatööstus	
Pealkiri eesti keeles: Harvendusraie vajaduse hindamine aerolidari andmetelt Laeva katsealal			
Lehekülgi: 43	Jooniseid: 6	Tabeleid: 5	Lisasid: 2
Osakond: Metsakorralduse ja metsatööstuse õppetool Uurimisvaldkond: Metsakorraldus Juhendajad: Tauri Arumäe ja Mait Lang Kaitsmiskoht ja aasta: Tartu, 2018			
<p>Uurimustöö eesmärk oli koostada metsa laserskanneerimise (ALS) andmetel töötav mudel, mis võimaldaks hinnata puistute harvendusraie-eelset hõredust. Selle eesmärgi saavutamiseks modifitseeriti olemasolevat metsaregistri andmetel töötavat raie-eelse hõreduse (L_{re}) arvutamise mudelit, mille sisendparameetriteks on puistu keskmine diameeter (D) ja kõrgusindeks (H_{100}).</p> <p>Töö esimeseks etapiks oli Maa-Ameti poolt 2013. aastal Laeva katseala kohta kogutud lidariandmete töötlemine, mille tulemusena saadi iga katsealal oleva eraldise kohta punktipilv. Sellele järgnes metsaregistri andmete töötlemine, kust valiti välja potentsiaalselt harvendusraiet vajavad puistud. Kolmanda etapina koostati nende andmetega mudelid, kus prognoositavaks tunnuseks oli L_{re}. Mudelite koostamisel asendati D erinevate lidari andmete põhjal arvutatud punktipilve kõrgusjaotuse protsentiilidega. Lisaks prooviti mudelisse lisada erinevaid võrastiku katvuse hinnanguid, laserimpulsi peegelduste kõrguste keskväärtust ja standardhälvet.</p> <p>Tulemuseks saadi 14 erineva kujuga kuid statistiliste karakteristikute poolest sarnast mudelit. Mudelites kasutatud ALS meetrikuteks olid kõrgusjaotuse 90 ja 95 protsentiilid (H_{P90}, H_{P95}), kõigi peegelduste katvuse hinnang 1,3 m kõrguselt ($K_{A1,3}$), esimeste</p>			

peegelduste katvuse hinnangud 1,3 m ja 8 m kõrguselt ($K_{1_1,3}$, K_{1_8}) ning punktipilve kõrguste standardhälve (H_{SD}). Kõik mudelid osutusid oluliseks ($p > 0,001$), determinatsioonikordaja (R^2) varieerus 0,67-0,72, jääkviga (σ) 0,27-0,29, keskmine hinnangu viga (MEE) 0,08-0,13 ja ruutkeskmine viga (RMSE) 0,37-0,44. Saadud tulemuste valideerimiseks kasutati eraldi andmestikku.

Graafikute tõlgendamise ja mudelites kasutatud liikmete seoste uurimisel puistu hõredusega (L) võiks esile tõsta mudelid L_{reALS7} ja L_{reALS8} , kus olid sõltumatuteks tunnusteks H_{SD} , H_{P90} ja H_{P95} .

Märksõnad: kaugseire, metsakorraldus, puistu hõredus, harvendusraie kavandamine

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Martin Kõks		Speciality: Forest industry	
Title: Estimation of thinning necessity in Laeva test site using airborne laser scanning data			
Pages: 43	Figures: 6	Tables: 5	Appendixes: 2
Department: Chair of forest management and planning and wood processing technologies Field of research: Forest management Supervisors: Tauri Arumäe, Mait Lang Place and date: Tartu, 2018			
<p>The objective of this thesis was to construct models that predict thinning necessity in forest stands by using airborne laser scanning (ALS) data and site index from forest inventory database. To achieve this, a model that predicts the stand sparsity when thinning is required (L_{re}), was taken as a starting point and modified.</p> <p>First step was to process ALS data gathered by Estonian Land Board in 2013 for Laeva test site. That was followed by processing data from National Register of Forest Resource for the Laeva test site. Third step was to create glm (<i>generalized linear model</i>) models with the data where L_{re} was the predicted variable. ALS point cloud metrics were used to replace stand breast height diameter (DBH) in the original L_{re} model.</p> <p>In total 14 models ($L_{re}ALS_n$) were created this way. Models were validated using an independent data set from the Laeva test site. The models had 90th and 95th height percentiles (H_{p90}, H_{p95}), canopy cover estimation from all returns at 1,3 m ($K_{A1,3}$), canopy cover estimations from first returns at 1,3 m and 8 m ($K_{I1,3}$, K_{I8}) and standard deviation of the height points (H_{SD}) as independent variables. Determination coefficient (R^2) of the models varied from 0,67-0,75, standard deviation (σ) 0,27-0,29, mean estimated error</p>			

(MEE) 0,08-0,13 and root mean square error (RMSE) 0,37-0,44. All the models were significant ($p > 0,001$).

After interpreting validation graphs and looking at correlations between L and all the variables used in the models it can be said that models $L_{re}ALS_7$ and $L_{re}ALS_8$ should be looked at first when doing further research.

Keywords: remote sensing, forest management, stand sparsity, thinning planning

Sisukord

Lühendite ja tähiste loetelu.....	7
Sissejuhatus	8
1 Kirjanduse ülevaade.....	10
1.1 Harvendusraie definitsioon ja metsamajanduslik tähtsus	10
1.2 Lidarimõõdistused	11
2 Materjal ja metoodika.....	14
2.1 Katseala kirjeldus.....	14
2.2 Kaardimaterjal ja lasermõõdistuste andmed	14
2.3 Metoodika	15
2.3.1 Lidari andmete töötlemine.....	15
2.3.2 Takseerandmete töötlemine	16
2.3.3 Lidarmõõdistuse andmetele tugineva mudeli koostamine	20
3 Tulemused	22
3.1 Lidarmõõdistuse andmetel põhinevad mudelid	22
3.1.1 Mudelite statistikud ja parameetrid	25
3.1.2 Mudelite seoste graafikud originaalandmestikul	27
3.2 Tulemuste valideerimine sõltumatul andmestikul	28
3.3 Tulemuste praktilise rakendamise võimalustest	29
4 Arutelu.....	31
Kokkuvõte	35
Kasutatud kirjandus	37
LISAD	39
Lisa 1. Mudelite parameetrite tõlgendamist lihtsustav tabel	40
Lisa 2. Puistu keskmise diameetri seosed mudelites kasutatud parameetritega.....	41

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

DTM	- <i>Digital terrain model</i> – maapinna kõrgusmudel
GNSS	- <i>Global Navigation Satellite System</i> – ülemaailmne satelliitnavigatsioonisüsteem
H ₁₀₀	– Puistu kõrgusindeks
H _{P25}	– Lidari punktipilve kõrgusjaotuse 25-protsentiil
H _{P90}	– Lidari punktipilve kõrgusjaotuse 90-protsentiil
H _{P95}	– Lidari punktipilve kõrgusjaotuse 95-protsentiil
H _{SD}	– Lidari punktipilve kõrguste standardhälve
IMU	- <i>Inertial measurement unit</i> – õhusõiduki asendiandur
K _{l_1,3}	- Katvuse hinnang esimeste peegeldustega 1,3 m kõrguselt
K _{l_8}	– Katvuse hinnang esimeste peegeldustega 8 m kõrguselt
K _{A1,3}	– Katvuse hinnang kõigi peegeldustega 1,3 m kõrguselt
k-MSN	- <i>Non-parametric nearest neighbour method</i> – mitteparameetriline lähima naabri meetod
KS	- Kask
KU	- Kuusk
MA	- Mänd

SISSEJUHATUS

Lidar (*Light Detection And Ranging*) on kaugseires kasutatav mõõteriist, millel on kolm peamist osa: impulssi edastav saatja, vastuvõtja/salvesti ja opto-mehhaaniline seade. Lidari poolt kindlas suunas emiteeritud valgusimpulsid kas peegelduvad tagasi, hajuvad või neelduvad sõltuvalt uuritava pinna ja keskkonna omadustest. Seadme vastuvõtjasse tagasi peegeldunud impulsside töötlemisel saadakse kolmemõõtmeline punktivarv, mille iga punkt annab infot selle objekti kohta, millelt ta tagasi peegeldus. Aerolidari impulsside peegelduste asukoha-koordinaadid (X, Y, Z) arvutatakse aja põhjal, mis kulub impulsil edasi-tagasi liikumiseks ning lennuki asendiandurite ja GNSS süsteemide järgi. (Heritage, Large 2009; Large, Heritage 2009)

Kaugseire peamine kasulikkus seisneb selles, et see võimaldab lühikese ajaga koguda andmeid korraga suurte alade kohta, mille hulka kuuluvad ka metsamassiivid. Eesti metsanduses hakati kaugseiret laialdasemalt kasutama 1960ndatest aastatest, kui metsakorralduse aluseks võeti mustvalged nähtava ja lähiinfrapunase spektripiirkonna kujutist kandvad paberkujul aerofotod, mida tõlgendati visuaalselt (Lang *et al.* 2012). Esimene, terve Eesti kõrguspunktidega kattev aerolaserskaneerimise ring tehti Maa-Ameti poolt aastatel 2008-2011 (Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid 2018). Täna on tehtud ka teine ring (aastatel 2012-2015), kust pärinevad ka käesolevas töös kasutatud andmed.

Harvendusraie on üks olulisemaid metsakasvatustlikke töid, mille käigus eemaldatakse puistust üleliigsed puud, et luua paremad kasvutingimused allesjäänutele ning seeläbi tõsta metsa väärtust uuendusraiel. Üleliigseteks loetakse puud, mille alt vabanevat kasvuruumi suudavad paremini ära kasutada nende naabrid, kasvatades väärtuslikumat puitu või luues sobivama looduskeskkonna (Korjus 1999). Harvendusraie vajaduse määramisel on metsade optimaalseks majandamiseks vaja informatsiooni, mille hankimine on üsna töömahukas ja aeganõudev. Aerolidari andmetel põhinevate mudelite kasutamine lihtsustaks antud olukorda, sest korraga on võimalik anda informatsiooni suurte alade kohta.

Käesoleva töö eesmärk oli testida harvendusraie vajadust kirjeldavas mudelis puistu keskmise diameetri (D) asendamist ALS andmetega Laeva katsealal. Mudel, kus D

asendati, on Korjuse (1999) koostatud raie-eelse hõreduse arvutamise mudel. Mudeli arendamiseks töödeldi Maa-Ameti poolt Laeva katseala kohta kogutud lidari andmeid, mille tulemusena saadi punktipilvest numbriline andmestik iga katsealal oleva eraldise kohta. Metsaregistri andmete töötlemisel oli eesmärk katsealalt kätte saada ainult potentsiaalselt harvendusraiet vajavad puistud. Andmetöötlusele järgnes modelleerimine, kus prognoositav tunnus (raie-eelne hõredus) arvutati metsaregistri andmestikust ning prognoosivad tunnused (v.a boniteet H_{100}) võeti punktipilvest. Kirjeldatud on ka käesoleva töö edasi arendamise võimalusi ning saadud tulemuste kasutamise võimalusi praktikas.

1 KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1 Harvendusraie definitsioon ja metsamajanduslik tähtsus

Harvendusraie on hooldusraiete hulka kuuluv raieviis, mida võib teha alates 8-sentimeetrise ja suurema keskmise rinnasdiameetriga puistutes (Metsa majandamise eeskiri 2006, § 6). Harvendamise eesmärkideks on metsa väärtuse tõstmine, metsa tiheduse ja koosseisu reguleerimine ning lähitulevikus igal juhul välja langevate puude kohene utiliseerimine. Harvendusjärgse puistu minimaalne rinnaspindala on määratletud metsa majandamise eeskirja lisas 1 (Metsa majandamise eeskiri 2006). Maksimaalne kavandatav väljaraie puistu esimesest rindest koos kokkuveoteedelt raiutud puiduga on 40% rinde raieeelsest tagavarast (Metsa korraldamise juhend 2009, § 17). Kogu Eestis raiemahust 2015. ja 2016. aastal moodustasid harvendused vastavalt 12% ja 11% (Aastaraamat mets 2016).

Peamiselt tehakse harvendusraieid majanduslikel eesmärkidel. Kuid igal majandusvõttel, mida metsas kasutatakse, peaks olema ka metsa kasvamise seisukohast põhjendus. Harvendamise vajalikkust saab põhjendada sellega, et puude võrad hoitakse optimaalse pikkusega, millega säilitatakse tüvede jämeduskasv. Kui puudel on olnud alates noorest east mõõdukas tihedus (suurenenud vahekaugused), siis see kujundab neil tugevama tüve (optimaalse kõrguse ja diameetri suhte) ja juurestiku ning need puud on vastupidavamad lume ja tuule poolt tekitatud raskustele. Vajalikku rolli mängib harvendusraie ka tulevaste seemnepuude planeerimisel, kuna võimaldab neile rohkem kasvuruumi, läbi mille areneb võra paremini ja annab hiljem hea seemnesaagi. Lisaks tõuseb ka tormikindlus. (Laas *et al.* 2011)

Puutumata ei jää ka metsaalune, kuna hõrendatud liitusega metsa alla koguneb talvel rohkesti lund, mille tõttu külmub maapind talvel vähem ning kevadel sulab kiiremini. Lisaks sellele parandab harvendamine marjaliikide valgustingimusi, suurendab õite hulka ja marjasaaki. Veel on võimalik harvenduse kaudu suurendada puistu puhkemajanduslikku väärtust, tehes raiet ka maastikukujunduslikust vaatepunktist lähtuvalt. Viimane võimaldab kujundada sobivaid vaateid, puhkekohti ja teeääri. (*Ibid.*)

Hooldusraie vajalikkus puistus otsustatakse puistute valiku kriteeriumi alusel, milleks on reeglistik, mis paneb paika hinnatavad tunnused ja nende väärtused. Tavaliselt koosneb see kriteerium valikufunktsioonist ja valikupiirangutest. Valikufunktsioon paneb paika puistu tiheduse (rinnaspindala, hõredus, tagavara jm.) seosed teiste puistu tunnustega (kõrgus, boniteet, vanus, diameeter jm.). Valikupiirangud määravad puistute parameetrid, milles valikufunktsiooni kasutatakse. Hooldusraiate kavandamine ei ole mõttekas kõrge vanuse või madala boniteediga puistutes, mis ei ole võimelised täitma hooldusraiele seatud eesmärgi. Hooldusraiate kavandamiseks modelleerimise abil soovitatakse kasutada puistu hõreduse (L) ja diameetri (D) vahelist seost, kus täiendavaks tunnuseks on lisatud puistu täius (Korjus 1999).

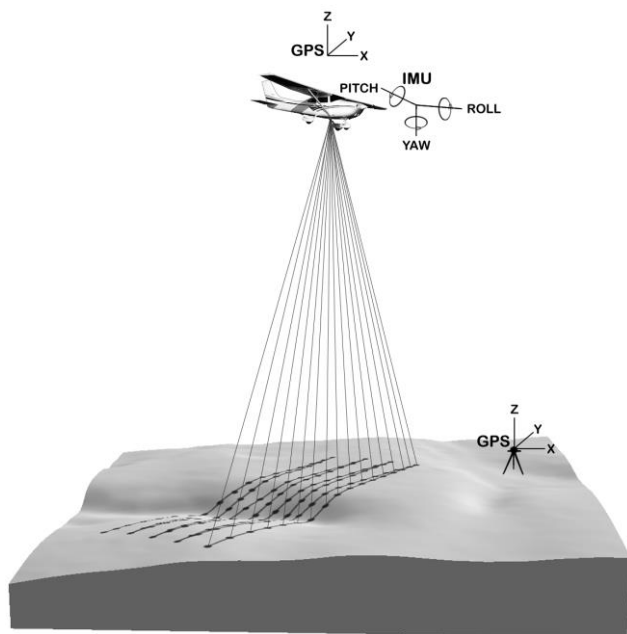
Laas *et al.* (2011) jagavad harvendusraiate mõjud kolme peamisse kategooriasse. Esiteks, majanduslikust vaatepunktist peab harvendusraie tõstma puistus puidu tagavara ja seeläbi metsa väärtust. Samas langetab lõppraie töökulu m^3 kohta, sest peened puud on välja raiutud ja tänu sellele on töö tegemine lihtsustatud. Teiseks, ökoloogilisest seisukohast antakse uuele okaspuupõlvkonnale head tekke- või kasvueeldused ja kiirendatakse kõdu lagunemiskiirust, kuid samas vähendatakse puistu bioloogilist mitmekesisust. Viimasena tuuakse sotsiaalse poole pealt välja, et raiest teatud aja möödudes suurenevad rekreatiivsed väärtused, kuna inimestel on mugavam metsas liigelda. Paraneb ka metsatöötajate majanduslik järg.

1.2 Lidarimõõdistused

Esimene kauguse mõõtmine laseriga tehti 1966. aastal ning esimene joondamise laser 1971. aastal. Esialgu kasutasid neid peamiselt insenerid ning ehitussektor, kuid pärast seda kui seadmed muudeti veekindlaks, hakkasid asja vastu suurt huvi tundma keskkonnateadlased. Seega toimus 1980-1990ndatel valdkonnas suur areng (Price, Uren 1989).

Lidar võimaldab teha laseri baasil vahemaade mõõtmisi seadeldist kandva lennuki ja maapinna vahel. Mõõtmistulemuste töötlemisel on võimalik saada digitaalne kõrguse mudel 15 cm täpsusega (Charlton *et al.* 2003). Lennukiga andmete kogumisel tehakse mõõtmisi küljelt-küljele ribadena (Baltsavias 1999), mis loob olukorra, kus riba keskel olevad mõõtmistulemused on täpsemad, kui servades (Large, Heritage 2009). Kirjeldatud

viisil (joonis 1) kogutud andmetest luuakse spetsiaalse tarkvara abil kõrgusmodel, mida saab kasutada maapinna ja seal olevate objektide kirjeldamiseks.



Joonis 1. Aerolaserskaneerimise protsessi selgitav joonis, kus on kujutatud lennukil paiknevast skannerist väljuvad impulsid, lennukil ja maa peal olevad GNSS seadmed ning lennuki asendiandur (IMU) (Andersen *et al.* 2006).

Horisontaalne ja vertikaalne täpsus sõltuvad lennukõrgusest ja lidari impulsisagedusest. Eestis on Maa-Ameti poolt tehtavate lendude regulaarne kõrgus 2400 m (25 cm piksliga ortofotode valmistamiseks) looduslike alade kohal ning 1300-1500 m tiheasustusega alade kohal (Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid 2018). Õhusõiduki külge monteeritavad lidarid emiteerivad reeglina 5000-50 000 signaali sekundis, kuid on ka masinaid, mis suudavad tekitada 100 000 impulssi sekundis (Optech ALTM3100EA) 167 kHz juures (Large, Heritage 2009). Maapinnale langevatel punktidel on kaks suunda, lennusuunas ja lennusuunaga risti. Lennusuunas mõjutab punktide paiknemist lennukiirus, ristisuunas skaneerimise nurk ja kõrgus. Laserkiire diameeter maapinnal sõltub igale skannerile vastavast kiire divergentsist ja lennukõrgusest, olles tavaliselt vahemikus 0,5-1 m (*Ibid.*).

Aerolidariga on tänapäeva tehnoloogiaga võimalik koguda topograafilisi andmeid kuni 90 km² tunnis. See teeb lidarist kõige tõhusama mõõtmisseadme, kuid võib esineda probleeme

andemete usaldusväärsusega. Mõõtmisvigasid võib tekkida, kui andmed pärinevad ainult ühest mõõtekorrast või kui mõõdetakse topograafiliselt keerulisel maapinnal. Lisaks võib vigu põhjustada see, kui lennukil on olnud kergeid kõrvalekaldeid täiesti sirgelt trajektoorilt ning vead avalduvad kõrgusmõõtmistes. Need probleemid on tõenäolisemad kõrge või väga tiheda taimestikuga aladel. Probleeme võib tekitada ka tihe põõsarinne, kuna see takistab impulsside maapinnale jõudmist, mistõttu tuleb maapinna kõrguse hindamine teha väiksema arvu vaatluste põhjal ja on ebatäpsem. Kui lende teha piirkondades, kus on võimalik GNSSi täpsust optimeerida (vähemalt 6 GNSS satelliiti on vaateväljas) on teoreetiliselt võimalik saada vertikaalne täpsus 7-8 cm. Tuleb meele pidada, et individuaalsed mõõtmised impulsi suuna, kiiruse, kõrguse ja peegeldumise nurga kohta tehakse lidari erinevate sensorite poolt erineval ajal. Seega peab teadma väga täpselt, mis ajal teatud mõõtmine tehti, või siis tuleb teada mõõtmisaegade erinevusi mõõtmiste vahel, et teha hilisemaid parandusi (Katzenbeisser 2003).

2 MATERJAL JA METOODIKA

2.1 Katseala kirjeldus

Katseala, mis asub Lõuna-Eestis, Laeva metsandikus (koordinaadid EPSG:3310 projektsioonis: 6490854 N; 642472 E), on suurusega 15×15 km ning seal kasvavad valdavalt mitmerindelised segapuistud. Üldiselt on ala tasane ning umbes pool sellest on kaetud metsaga. Domineerivateks puuliikideks on harilik haab (*Populus tremula* (L.)), arukask (*Betula pendula* Roth), harilik kuusk (*Picea abies* (L.) H. Karst.) ning hall lepp (*Alnus incana* L.) ja must lepp (*Alnus glutinosa* L.). Madalama viljakusega piirkondades leidub ka hariliku männi puistuid. Teises rindes leidub ka harilikku kuuske. Enamus alasse kuuluvatest metsadest on aktiivselt majandatud (Lang *et al.* 2014).

2.2 Kaardimaterjal ja lasermõõdistuste andmed

Töös kasutatavad lasermõõdistuste andmed pärinevad Eesti Maa-Ameti metsanduslikult erilennult 2013. aastal. Mõõtmistel kasutati aerolaserskannerit Leica ALS50-II (Leica 2007) ning lennati vahemikus 2.06-10.07. Tulemusena saadud punktidest umbes pooled kirjeldavad maapinda ning ülejäänud maapinnast kõrgemal olevaid objekte (sh taimestikku).

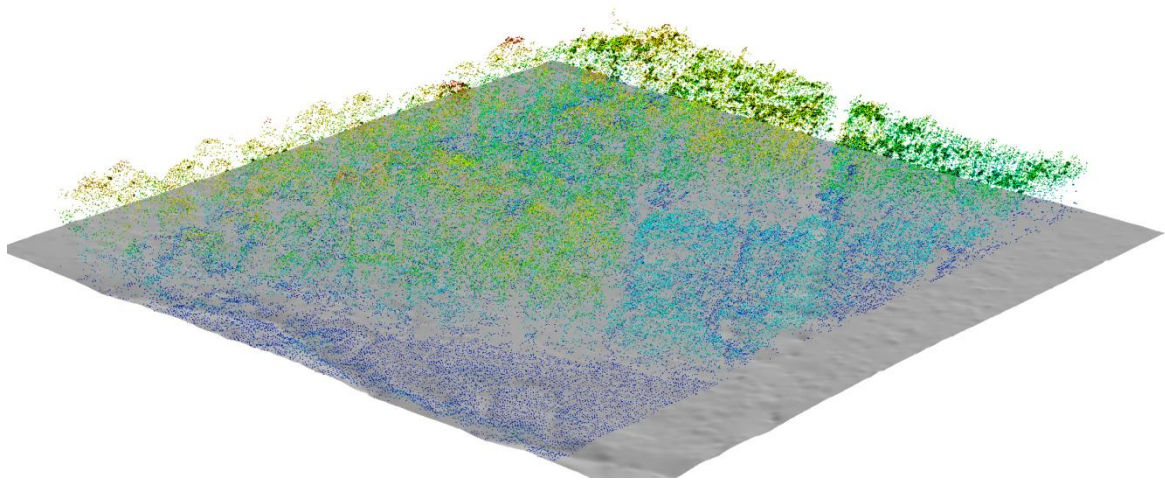
Mõõdistamisel oli lennukõrguseks 1800 m ning keskmiseks punktitiheuseks maapinnal saadi $2,0 \text{ p/m}^2$. Skaneerimisnurk oli kuni 27 kraadi ning esimeste ja kõigi peegelduste suhtarv 0,79. Laserimpulsi peegelduste (laserpunktide) koordinaadid on antud L-EST97 süsteemis ning punktide kõrgused on BK77 süsteemi arvutatud kasutades geoidi mudelit EST-GEOID2011 (Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid 2018). Eraldiste piiride vektorkiht ja takseertunnuseid sisaldav andmestik pärineb Metsaregistri andmebaasist seisuga märts 2018 (Metsaressursi. 2007).

Andmete töötlemiseks kasutati programme FUSION/LDV 3.60 (McGaughey 2014), ArcMap 10.5.1, R 3.4.3 ja Microsoft Excel 2010.

2.3 Metoodika

2.3.1 Lidari andmete töötlemine

Laserandmetest filtreeriti alustuseks maapinnalähedased peegeldused, kasutades FUSIONi moodulit *GroundFilter* ja koostati mooduliga *GridSurfaceCreate* maapinna kõrgusmudel (joonis 2) (DTM – *digital terrain model*).



Joonis 2. Aerolidari punktipilv koos maapinna kõrgusmudeliga.

Pärast seda lahutati *ClipData* mooduliga DTM peegelduste üldisest punktipilvest. Maapinna kõrguse suhtes normeeritud punktipilvest lõigati *PolyClipData* mooduliga metsaeraldiste piiride järgi eraldisepõhised punktipilved. Eraldatud pilvedele arvutati pilve kirjeldavad meetrikud mooduliga *CloudMetrics*.



Joonis 3. Puhverdatud eraldise kujutis.

PolyClipData moodulis kasutatud metsaeraldiste piirid olid eelnevalt programmiga ArcMap 10 meetrit sissepoole puhverdatud (joonis 3), et vältida servaefektist tulenevaid võimalikke vigu. Valimist jäeti välja alla 1 ha suurused eraldised, et vähendada servaefekti mõju.

2.3.2 Takseerandmete töötlemine

Metsaregistrist pärinevad andmed olid jaotatud kahte, katsealal olevaid puistuelemente ja katseala olevaid eraldisi kirjeldavatesse tabelitesse.

Elementide andmestikus olid käesoleva töö jaoks olulisemad järgnevad takseertunnused:

- 1) eraldise ID - võimaldab elementi eraldisega siduda;
- 2) rinde kood - määrab elemendi rinde (1, 2, Y, A või J);
- 3) puuliik - elemendi puuliik;
- 4) vanus - elemendi vanus takseerimise hetkel, aastates;
- 5) kõrgus - elemendi kõrgus meetrites;
- 6) diameeter - elemendi kõrgus 1,3 m kõrguselt, mõõdetakse sentimeetrites ja esitatakse täisarvuna;
- 7) puude arv - ühik tk/ha;
- 8) elemendi osakaal - elemendi tagavara suhe rinde üldtagavarasse protsentides;
- 9) enamuspuuliik - märgitakse 1 kui tegemist on eraldise esimese rinde enamuspuuliigiga.

Eraldiste andmestikust kasutati järgnevaid takseertunnuseid katseala kohta:

- 1) ID - registris unikaalne number;
- 2) inventeerimise kuupäev - eraldise takseerimise kuupäev;
- 3) pindala - eraldise pindala, ha;
- 4) kõrgus - puistu baaskõrgus meetrites, arvutatakse ainult enamuspuuliigile;
- 5) juurdekasv - puistuelementide tagavara juurdekasvu summa, tm/ha/a;
- 6) boniteet - määrab eraldise kasvukoha headuse (Ia-V).

Metsaregistri andmetest valimi tegemisel lähtuti harvendusraietele kehtivatest normatiividest (Hooldusraiete normatiivid 1980). Esialgsesse valimisse (477 eraldist) kuuluvad esimese rinde männi, kuuse ja kase puistuelemendid, kus enamuspuuliigi osakaal on suurem kui 60%, boniteet Ia – IV ning diameeter üle 6 cm. Vanuseliseks piiranguks oli männi puhul 21-60 ning kuuse ja kase puhul 21-50 aastat. Lisamata jäi andmete inventeerimise kuupäeva piirang, mis ei mõjuta tänu suurele vaatluste hulgale mudelite sisu, küll aga suurendab veidi hajuvust nende mudelite kasutamisel.

Eraldi loodi andmestik, mis ei sisaldanud ühtegi esialgses valimis olevat eraldist, ning mida kasutati hiljem mudelite valideerimiseks. Selle andmestiku loomiseks kasutati sarnaseid nõudeid nagu esialgse valimi puhul, eemaldati ainult pindala piirang ja lisati inventeerimise kuupäeva piirang (2011.01.01). Nii saadi valideerimise andmestiku suuruseks 105 eraldist.

Andmetöötamise esimeseks osaks oli kõrgusindeksi (H_{100}), rinnaspindala (G), puude arvu (N) ja hõreduse (L) arvutamine hektari kohta igale puistuelemendile. Metsaregistri andmestik küll sisaldab G aga need arvutati uuesti esimese rinde puistuelementide jaoks, sest käesolevas töös tegeleti ainult nendega. Lisaks esines metsaregistri andmestikus ka olukorda, kus G puudus aga see-eest olid olemas D ja N, seega sai G arvutamisel kasutada

rohkem puistuelemente. Pärast seda liideti puistuelementidele saadud väärtused eraldisepõhiselt kokku ja arvutati iga eraldise kohta rinnaspindala kaudu keskmine diameeter, puude arv ja hõredus.

Kõrgusindeksite H_{100} ja H_{50} [m] arvutamise valemid (Metsa korraldamise juhend 2009, lisa 10)

$$H_{100} = \frac{H_{50}}{[1 + (\alpha + \beta \cdot H_{50}) \cdot (0,5^c - 1)]}, \quad (1)$$

$$H_{50} = \frac{H \cdot \{1 + \alpha \cdot \left[\left(\frac{50}{A}\right)^c - 1\right]\}}{\{1 - \beta \cdot H \cdot \left[\left(\frac{0,5}{A}\right)^2 - 1\right]\}}, \quad (2)$$

kus H_{50} on kõrgusindeks 50 aasta vanuses puistus;

H – enamuspuuliigi keskmine kõrgus m;

A – enamuspuuliigi keskmine vanus aastates;

α , β ja c – valemite kordajad vastavalt tabelile 1.

Tabel 1. Valemite parameetrid kõrgusindeksite arvutamiseks (Metsa korraldamise juhend 2009, lisa 10)

Puuliikide grupp	Kordaja		
	α	β	c
Mänd ja kõvad lehtpuud	0,7283	-0,0109	1,3925
Kuusk ja teised okaspuud	0,7977	-0,0137	1,6116
Pehmed lehtpuud	0,7298	-0,0161	1,346

Puistu rinnaspindala (G) arvutamise valem (Vaus 2005)

$$G = \frac{N \cdot \pi \cdot D^2}{40000}, \quad (3)$$

kus N on elemendi puude arv tk/ha;

D – elemendi puude keskmine rinnasläbimõõt cm.

Metsaregistri andmestikus olid mõned puistuelemendid, millel puudus andmebaasis puude arv, seega polnud neile võimalik arvutada rinnaspindala ning need jäeti valimist välja.

Puistu hõredus (L) [m] arvutati (Vaus 2005)

$$L = \frac{100}{\sqrt{N}}, \quad (4)$$

kus N – puude arv tk/ha.

Viimaks arvutati igale eraldisele puuliigi põhiselt raie-eelne hõredus, kasutades selleks Korjuse (1999) loodud mudeleid.

Valemid raie-eelse hõreduse (L_{re}) arvutamiseks männile, kuusele ja kasele

$$L_{re,MA} = 143,6 + 14,2 \cdot D - 3,4 \cdot H_{100}, \quad (5)$$

$$L_{re,KU} = 91,8 + 12,9 \cdot D - 1,2 \cdot H_{100}, \quad (6)$$

$$L_{re,KS} = 71,4 + 14,7 \cdot D, \quad (7)$$

kus H_{100} on puistu kõrgusindeks m;

D on puistu keskmine rinnasdiameeter cm.

2.3.3 Lidarmõõdistuse andmetele tugineva mudeli koostamine

Harvendusraie modelleerimisel on eelistatav kasutada puistu tasemel mudeleid, sest need sobivad paremini meie metsakorralduse andmebaasis olevate andmete struktuuriga. Kuid need mudelid on vähem tundlikud puistu eripärade suhtes ning üldjuhul pakuvad igale puistule vaid ühe hooldusraiete skeemi, võimaldamata valida alternatiivide vahel. (Korjus 1999).

Antud töös on eesmärgiks harvendusraiete kavandamiseks mõeldud mudelites (5-7) sisendargumentide asendamine eraldiste punktipilve meetrikutega. Kuna H_{100} sõltub kasvukohatingimustest, siis keskenduti puistu D asendamisele mõne punktipilve kõrgusprotsentiiliga, arvestades et H ja D vahel on tavaliselt üsna tugev seos (Padari 1999). Mudelite koostamisel prooviti punktipilve meetrikutest lisaks kõrgusjaotuse protsentiilidele veel erinevaid katvuse hinnanguid, punktide kõrguse standardhälvet ja punktide kõrguse keskväärtust. Kõrgusjaotuse protsentiile prooviti, sest nende ülemised väärtused on reeglina heas seoses metsa kõrgusega ja neid on varem kõrguse arvutamiseks kasutatud (Lang *et al.* 2012; Arumäe, Lang 2016). Katvuse hinnanguid prooviti, sest need võiks anda informatsiooni puistu tiheduse kohta, mis on harvendusraie seisukohast üks olulisemaid näitajaid.

Mudelite koostamist alustati erinevate punktipilve meetrikute lisamisega glm (*general linear model* - üldine lineaarne mudel) mudelisse, kus ainsaks kindlaks prognoosivaks liikmeks oli alguses metsaregistri andmetel arvutatud H_{100} . Liikmeid lisati ja vahetati ükshaaval ning prooviti läbi erinevaid võimalikke mudeleid. Saadud mudelitest eemaldati mitteolulised ($p > 0,05$) liikmed ja jäeti alles ainult need, kus oli kaks kuni viis kirjeldavat tunnust. Mudelite headuse hindamisel jälgiti ka statistikut *residual deviance*. Kõigi sisukate mudelite jääke prooviti omakorda lähendada mudelitest eemaldatud mitteoluliste liikmetega. Seda tehti selleks, et saada aimu, kas mõni prognoosiv liige osutub jääkide põhjal siiski oluliseks ning kas seda oleks võimalik tagasi algsesse mudelisse lisada. Selle meetodi abil leiti lisaks üks mudel. Kokku leiti selles faasis 10 sarnase headusega lihtsat mudelit ning läbi selle selgusid ka need punktipilve meetrikud, millega edasist tööd jätkata.

Seejärel kasutati sobivaid punktipilve meetrikuid (H_{100} , H_{P25} , H_{P90} , $K_{A1,3}$, H_{SD} ja $K_{I-1,3}$) sammregressiooni tegemisel, et uurida tunnuste omavaheliste kombinatsioonide kasutamise võimalikkust mudelite koostamisel. Sammregressiooni esimeses võrrandis oli

63 liiget (6 lihtliiget ning 57 kombinatsiooni) ning sealt eemaldati ükshaaval mitteolulisi liikmeid, alustades kõige keerukamatest. Igal eemaldamisel saadi uus mudel ning liikmete elimineerimist jätkati, kuni alles jäi kuni 8 liikmega mudel või *residual deviance* hakkas sarnanema esimese meetodiga saadud lihtsate mudelitega. Nii saadi kokku veel 4 töös kasutatavat mudelit, mis teeb kogu mudelite arvuks 14.

Mudelite analüüsimiseks koostati R-is programm, mis arvutas igale mudelile R^2 (determinatsioonikordaja), σ (mudeli jääkhälve mudeli suhtes algandmetel), MEE (*mean estimation error* – keskmine hinnangu viga valideerimise põhjal) ja RMSE (*root mean square error* – ruutkeskmine viga valideerimise põhjal).

Valemid MEE ja RMSE arvutamiseks

$$MEE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n}, \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}, \quad (9)$$

kus y_i on funktsioontunnuse tegelik väärtus;

\hat{y}_i – funktsioontunnuse ennustatud väärtus;

n – vaatluste arv.

Lisaks toodi välja mudeli kokkuvõtetest koefitsiendid, p-väärtused ja parameetrite standardvead. Koostati joonised, mis kirjeldasid L_{re} ja $L_{re}ALS$ ning $L-L_{re}$ ja $L-L_{re}ALS$ suhteid, et aimu saada, kui sarnaselt kirjeldavad harvendusraie vajadust Korjuse (1999) ja käesolevas töös leitud mudelid.

3 TULEMUSED

3.1 Lidarmõõdistuse andmetel põhinevad mudelid

Mudelite loomisel eeldati, et parameetrite lisamisega kaasneb ka mudeli headuse tõus. Eeldus leidis tõestust, sest keerukamate mudelite R^2 , σ , MEE ja RMSE on paremad, kui lihtsatel mudelitel (tabel 2). Lihtsate mudelite all on silmas peetud mudeleid 1-10 ning keerukamad on 11-14, mis sisaldavad lisaks tavalistele liikmetele ka liikmete omavaheliste seostega prognoosivaid tunnuseid. Üldiselt on mudelite statistikud nii originaal-, kui ka valideerimisandmestikul liiga sarnased, et selle põhjal väita, et mingi mudel on teistest märgatavalt parem. Mudelite headuse hindamisel võiks seega kasutada *Occam*'i printsiipi ja seda, kui head on nende liikmete seosed metsa struktuuri, pilvemeetrikute ja harvendusraie vajaduse kirjeldamisel.

Võib teha mõned tähelepanekud mudelite liikmete märkide kohta. Näiteks on H_{100} lihtsamates mudelites alati positiivne ning liikmete omavaheliste kombinatsioonidega mudelites negatiivne (tabel 3). Lihtsatelt mudelitelt keerulistele üle minnes muutub ka vabaliikme märk. Välja võib tuua ka selle, et kõrgusega seotud liikmed ja standardhälve on lihtsates mudelites alati positiivse kaaluga.

Liikmete parameetrite ja nende suurusjärkude uurimise lihtsustamiseks tehti tabel (lisa 1). Keerukamates mudelites tulid kirjeldavate tunnuste $K_{A1,3} \times H_{P90}$, $K_{A1,3} \times K_{1-1,3}$, $H_{100} \times K_{A1,3} \times H_{P90}$ ja $K_{A1,3} \times K_{1-1,3} \times H_{SD}$ seostega liikmed alati positiivse kaaluga ning $H_{P90} \times K_{1-1,3}$ ja $K_{A1,3} \times H_{P90} \times K_{1-1,3}$ liikmetega seosed alati negatiivse kaaluga. Erinevates mudelites olevate liikmete suurusjärgud on sarnased.

Töö käigus loodud lidari andmete põhjal raie-eelset hõredust (L_{reALS_n}) kirjeldavad mudelid:

$$L_{reALS_1} = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + H_{sd}, \quad (10)$$

$$L_{re}ALS_2 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot H_{sd} + a_4 \cdot K_{1_1,3}, \quad (11)$$

$$L_{re}ALS_3 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{P90} + a_3 \cdot K_{1_8}, \quad (12)$$

$$L_{re}ALS_4 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot H_{sd} + a_4 \cdot K_{1_8} + a_5 \cdot H_{P90}, \quad (13)$$

$$L_{re}ALS_5 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot K_{1_8} + a_4 \cdot H_{sd}, \quad (14)$$

$$L_{re}ALS_6 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot H_{P90}, \quad (15)$$

$$L_{re}ALS_7 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{sd} + a_3 \cdot H_{P90}, \quad (16)$$

$$L_{re}ALS_8 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{P95}, \quad (17)$$

$$L_{re}ALS_9 = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{P95} + a_3 \cdot K_{1_1,3}, \quad (18)$$

$$L_{re}ALS_{10} = a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot H_{P95} + a_3 \cdot K_{1_1,3}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} L_{re}ALS_{11} = & a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot K_{A1,3} \cdot H_{P90} + a_4 \cdot H_{P90} \cdot K_{1_1,3} + \\ & a_5 \cdot K_{A1,3} \cdot K_{1_1,3} + a_6 \cdot H_{100} \cdot K_{A1,3} \cdot H_{P90} + a_7 \cdot K_{A1,3} \cdot H_{P90} \cdot K_{1_1,3} + a_8 \cdot K_{A1,3} \cdot \\ & K_{1_1,3} \cdot H_{sd}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} L_{re}ALS_{12} = & a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot H_{P90} \cdot K_{1_1,3} + \\ & + a_4 \cdot H_{100} \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} + a_5 \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} \cdot K_{1_1,3} + a_6 \cdot K_{A1,3} \cdot K_{1_1,3} \cdot H_{sd}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} L_{re}ALS_{13} = & a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} + a_3 \cdot H_{100} \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} + \\ & + a_4 \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} \cdot K_{1_1,3}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L_{re}ALS_{14} = & a_0 + a_1 \cdot H_{100} + a_2 \cdot H_{P90} + a_3 \cdot H_{P90} \cdot K_{1_1,3} + \\ & + a_4 \cdot H_{100} \cdot H_{P90} \cdot K_{A1,3} + a_5 \cdot K_{1_1,3} \cdot K_{A1,3} \cdot H_{sd}, \end{aligned} \quad (23)$$

kus kasutatud liikmete seletused on välja toodud töö lühendite ja tähiste loetelu osas.

3.1.1 Mudelite statistikud ja parameetrid

Mudelite parameetrite hindamiseks kasutatud andmestiku põhjal on arvatud R^2 ja σ , sest glm protseduur neid ei väljasta, ning valideerimisandmestiku põhjal MEE ja RMSE. Lidarimõõdistuste andmeid kasutavate mudelite statistikuid kirjeldab tabel 2. Tabelisse ei lisatud p -väärtust mudeli kohta, kuna see oli iga mudeli puhul $<0,001$. Determinatsioonikordaja varieerus kõigi mudelite vahel 0,04 võrra, mille põhjal võib väita, et mudelid on selles kirjeldusvõime osas üldiselt sarnased. Sama kehtib ka jääkvea, MEE ja RMSE puhul, kus väärtuste varieeruvused on vahemikus 0,02-0,07.

Tabel 2. Mudelite statistikud

Mudel	R^2	σ	MEE	RMSE
1	0,68	0,29	0,13	0,44
2	0,70	0,28	0,10	0,39
3	0,69	0,29	0,10	0,39
4	0,70	0,29	0,11	0,41
5	0,69	0,29	0,12	0,43
6	0,67	0,29	0,11	0,41
7	0,68	0,29	0,12	0,41
8	0,68	0,29	0,11	0,41
9	0,68	0,29	0,11	0,40
10	0,69	0,29	0,10	0,39
11	0,72	0,27	0,08	0,37
12	0,72	0,27	0,08	0,38
13	0,72	0,28	0,08	0,39
14	0,72	0,27	0,08	0,37

R^2 - determinatsioonikordaja; σ - standardhälve; MEE - keskmise hinnangu viga; RMSE – ruutkeskmise viga.

Tabel 3. Mudelite parameetrid

Mudel	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
1	-1,813	0,0509	0,0146	0,279					
2	-1,261	0,0515	0,0420	0,2911	0,0420				
3	-0,571	0,0504	0,123	-0,00565					
4	-1,334	0,0510	0,0104	0,140	-0,00614	0,0697			
5	-2,087	0,0509	0,0208	-0,00536	0,311				
6	-0,530	0,0511	-0,00329	0,109					
7	-0,756	0,0504	0,0684	0,0830					
8	-0,906	0,0684	0,104						
9	-0,496	0,0515	0,106	-0,00428					
10	-0,339	0,0526	0,0132	0,107	-0,0181				
11	3,666	-3,420e-02	-6,817e-02	4,694e-03	-2,314e-03	4,722e-04	6,280e-05	-3,784e-05	2,921e-05
12	1,652	-3,541e-02	2,508e-03	-8,664e-04	6,315e-05	-2,848e-05	2,041e-05		
13	1,577	-3,565e-02	2,126e-03	6,249e-05	-2,695e-05				
14	1,38	-2,514e-02	1,887e-01	-3,274e-03	5,626e-05	3,432e-05			

Tabelis 4 välja toodud mudelite p -väärtuste juures võib väita, et keerukamate mudelite puhul vähenes vaba- ja lihtliikme H_{100} olulisus, võrreldes lihtsate mudelitega.

Tabel 4. Mudelite parameetrite olulisus (p -väärtused)

Mudel	p_0	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8
1	<2e-16	<2e-16	<2e-16	<2e-16					
2	3,68e-09	2,76e-09	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16				
3	5,14e-06	< 2e-16	1,36e-07	< 2e-16					
4	9,79e-06	0,000724	1,42e-06	0,007095	0,005326	< 2e-16			
5	< 2e-16	2,2e-05	< 2e-16	< 2e-16	< 2e-16				
6	0,00325	< 2e-16	< 2e-16	0,03241					
7	4,38e-10	2,2e-05	< 2e-16	0,00188					
8	1,31e-13	< 2e-16	< 2e-16						
9	0,0133	<2e-16	<2e-16	0,0111					
10	0,100061	< 2e-16	< 2e-16	0,000544	0,005186				
11	0,000112	0,027215	0,018811	4,51e-05	0,000775	0,024967	1,48e-08	2,59e-08	0,000387
12	0,000114	0,022514	6,89e-08	0,008082	1,35e-08	< 2e-16	0,005622		
13	0,000213	0,021428	6,73e-10	1,70e-08	< 2e-16				
14	1,23e-05	0,025	< 2e-16	< 2e-16	3,36e-12	5,44e-06			

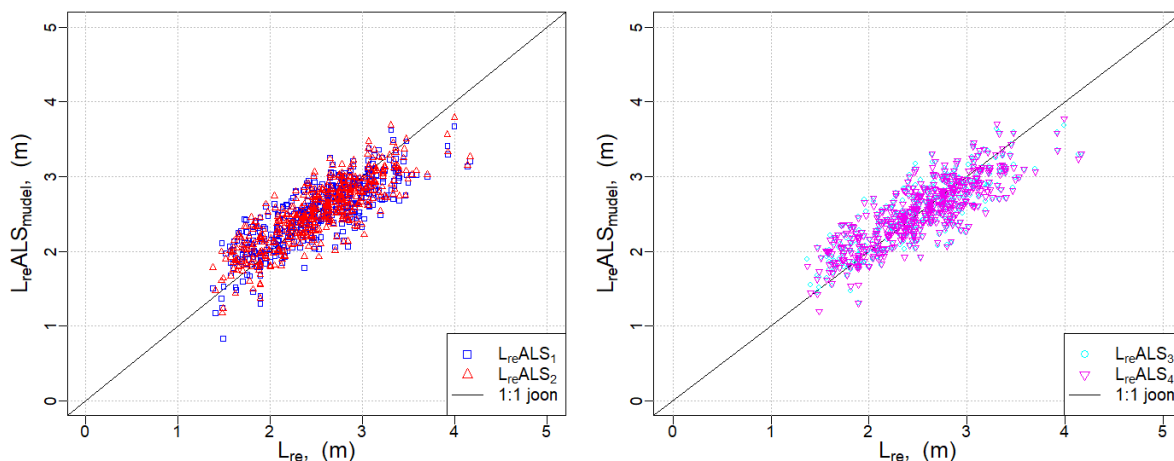
Tabel 5. Mudelite parameetrite standardvead

Mudel	SE ₀	SE ₁	SE ₂	SE ₃	SE ₄	SE ₅	SE ₆	SE ₇	SE ₈
1	0,196	0,0101	0,00155	0,00352					
2	0,210	0,00517	0,00997	0,00475	0,00339				
3	0,124	0,00478	0,00106	0,00336					
4	0,299	0,0205	0,00126	0,0518	0,00371	0,00342			
5	0,203	0,00125	0,0125	0,00211	0,00345				
6	0,179	0,00352	0,00395	0,00153					
7	0,119	0,00349	0,00862	0,0219					
8	0,119	0,00339	0,00375						
9	0,200	0,00347	0,00380	0,00168					
10	0,206	0,00347	0,00377	0,00521	0,00470				
11	9,408e-01	1,544e-02	2,892e-02	1,140e-03	6,837e-04	2,099e-04	1,089e-05	6,682e-06	8,170e-06
12	4,244e-01	1,547e-02	4,576e-04	3,257e-04	1,092e-05	1,854e-06	7,337e-06		
13	4,226e-01	1,545e-02	3,373e-04	1,089e-05	1,643e-06				
14	3,122e-01	1,118e-02	1,153e-02	3,622e-04	7,871e-06	7,461e-06			

Parameetrite standardvigadest (tabel 5) võib välja tuua selle, et vabaliikme ja H_{100} vead kasvasid keerukamate mudelite juures. Kõige väiksemad vead on kombinatsioonidega liikmetel.

3.1.2 Mudelite seoste graafikud originaalandmestikul

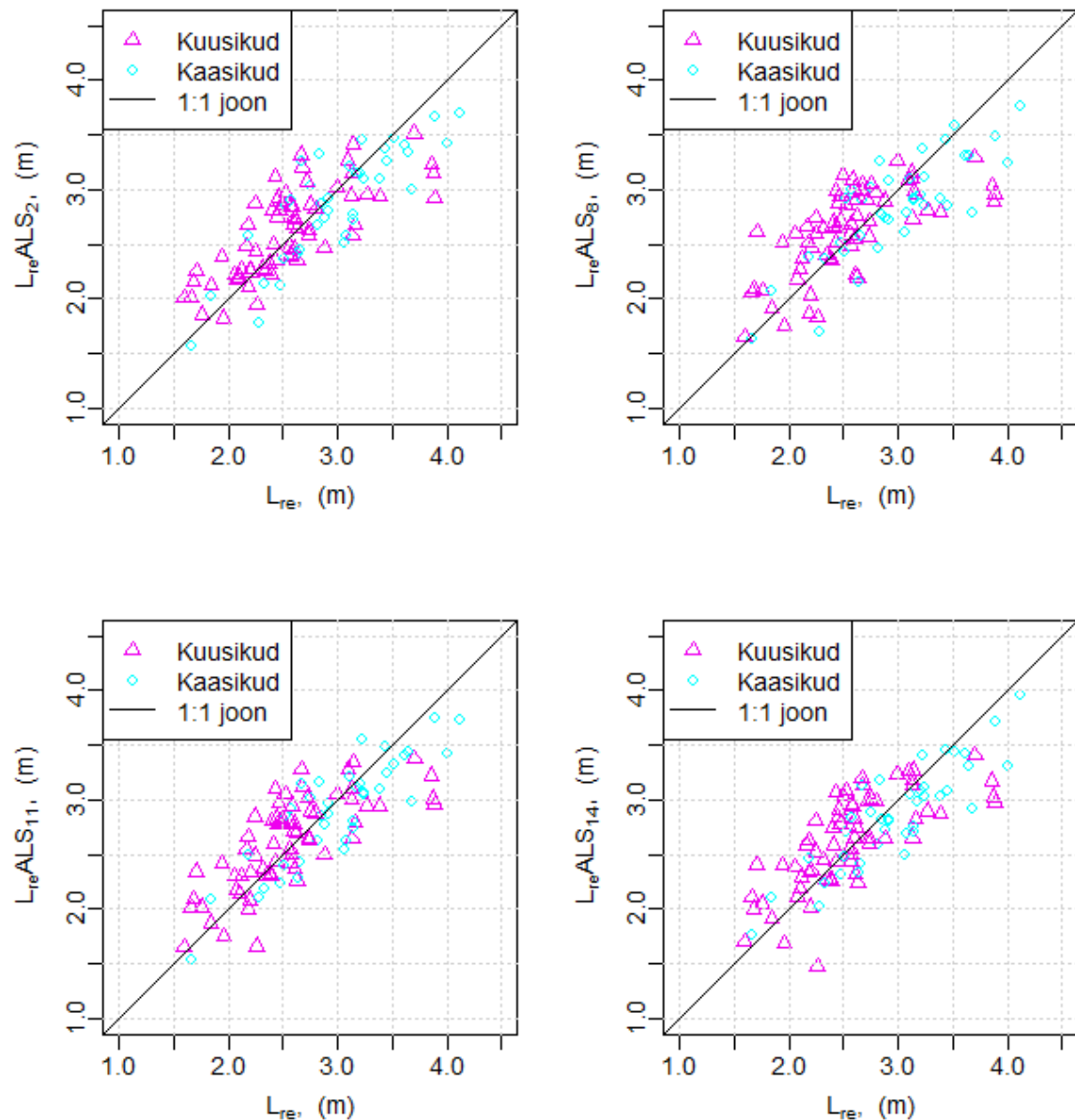
Joonisel 4 on kujutatud kaks graafikut, kus mõlemal on kirjeldatud kahe mudeli ($L_{re}ALS_1$, $L_{re}ALS_2$ ja $L_{re}ALS_3$, $L_{re}ALS_4$,) seoseid, kasutades sisendina originaalandmestikku. Seoseid ei ole esitatud kõigi mudelite kohta, kuna nad on omavahel küllalt sarnased. Kõigil on 1:1 joone keskmise osa ümbruses sarnaselt jaotunud pilv ning selle ülemisest osast eraldunud 1:1 joonest allpool paiknevad mõned punktid. Mudelite vahel muutub ka veel kergelt hajuvus, kuid sisuliselt säilib nende seoste vahel sarnasus.



Joonis 4. Originaalandmestikul arvatud mudelite $L_{re}ALS$ ja L_{re} seosed.

3.2 Tulemuste valideerimine sõltumatul andmestikul

Tulemuste valideerimiseks koostati graafikud, kus võrreldi Korjuse (1999) mudelitega arvatud L_{re} ja töös tehtud mudelitega arvatud $L_{re}ALS$ seoseid sõltumatul andmestikul. Graafikud tehti iga mudeli andmetega ning mudelite statistikute tabel (tabel 2) kinnitab, et mudelid on oma käitumiselt üsna sarnased. Mõned visuaalsel hinnangul teistest veidi paremate tulemustega mudelid on välja toodud joonisel 5. Üldiselt saab graafikutelt välja lugeda, et $L_{re}ALS$ hindab raie-eelset hõredust veidi suuremaks, kui seda teeb L_{re} . Kõigi mudelite puhul esineb süstemaatiliselt olukord, kus kased on visuaalsel hindamisel valdavalt 1:1 joonest ülevalpool ning kuused allpool. Tegemist võib olla puuliigi mõjuga, mille arvestamiseks tuleks mudelitesse sisse viia ka puuliiki kirjeldav tunnus.

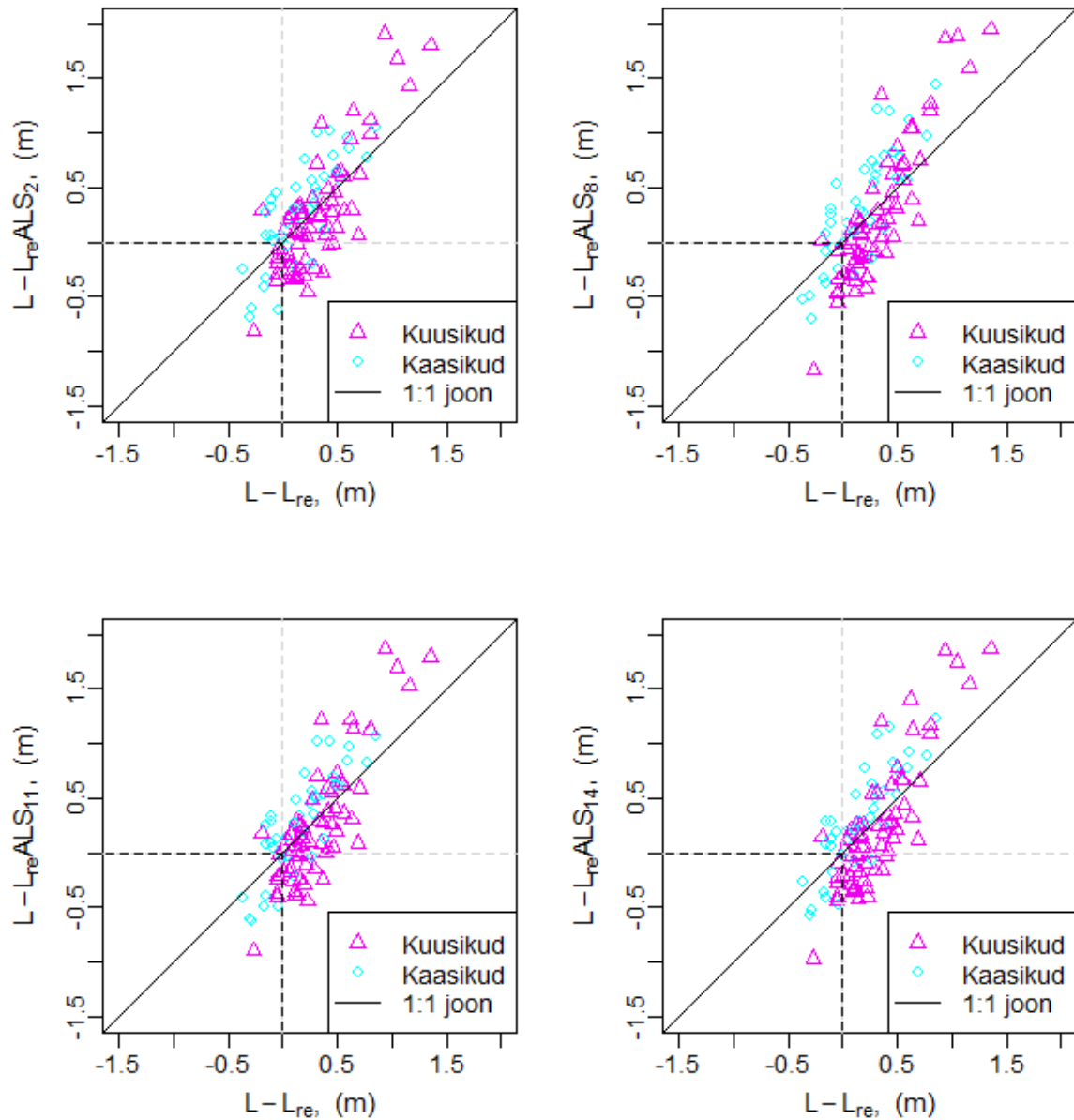


Joonis 5. Korjuse (1999) mudeliga arvatud L_{re} ja töös leitud mudelite L_{reALS} seoste graafikud.

3.3 Tulemuste praktilise rakendamise võimalustest

Puistusse tasub kavandada harvendusraiet, kui selle hõredus L on väiksem, kui L_{re} . Selle loogika põhjal on koostatud ka joonisel 6 olevad graafikud, kus eesmärgiks on selgelt välja tuua puistud, kus raie-eelne tihedus on suurem nii L_{re} kui ka L_{reALS} mudelite väitel. Allpool toodud graafikud on koostatud valideerimisandmestiku põhjal. Must kriipsjoon piirab kastina selle osa parvest, kus L_{re} on negatiivne. Need on puistud, mis tuleks

harvendamise kavandamisel esmajoones üle vaadata ja seejärel liikuda järjest positiivsemate väärustega puistute suunas. See on praktiline juhispõhine metsakasvatajatele.



Joonis 6. Metsaregistri andmete põhjal arvatud L ja L_{re} ning L ja L_{re}ALS vahede seosed. Musta värvi punktiirjoonega moodustatud kastike juhivad tähelepanu eraldistele, kus L_{re} on suurem, kui L ning mille harvendamise vajadust võiks esmajärjekorras kontrollida.

4 ARUTELU

Käesolevas töös loodud mudelite valideerimise tulemusi vaadates on läbivaks jooneks nende sarnasus, olenemata sellest, kas sisendparameetriteks on erinevad katvuse hinnangud, punktipilve kõrgusprotsentiilid, H_{SD} või nende omavahelised suhted. Siit võib esmapilgul välja lugeda, et puu D on mingil määral seoses kõigi eelpool mainitud liikmete ja nende kombinatsioonidega, sest kõik need liikmed olid küllalt võrdselt võimelised diameetrit mudelites asendama. Seoste kontrollimiseks tehti R-is eraldi joonised ja lm (lineaarne mudel) mudelid D ja kõigi mudelites kasutatud üksikute liikmete kohta. Kõik mudelid ja nendes olevad liikmed osutusid olulisteks, kus kõige madalama p -väärtusega (0,0001 ja 0,0006) olid seosed esimeste peegelduste katvusega. Jooniste (lisa 2) põhjal võib välja tuua seose olemasolu kõrguse protsentiilide puhul ning kiire küllastumise katvuse hinnangute puhul (Arumäe, Lang 2016), kõige parem nägi välja seos kõrguspunktide H_{SD} -ga. Samamoodi uuriti seoseid ka L kohta ning tulemused olid sarnased. Jällegi tõusis teistest paremate näitajatega esile H_{SD} . Headuse põhjuseks on arvatavasti see, et H_{SD} kirjeldab puistu kõrguse varieeruvust, mis võiks olla harvendust vajavate tihedate puistute korral suurem, sest need puistud sisaldavad rohkem erineva kõrgusega puid kui juba harvendatud homogeensemad puistud.

Selle informatsiooni põhjal võiks edasi uurida esmakorras mudeleid, mis sisaldavad H_{SD} -d ja kõrgusjaotuse protsentiile. Jätkuvalt tuleks eelistada lihtsate liikmetega mudeleid keerulisematele. Mõned mudelid, mida soovitaks edasi uurida on $L_{re}ALS_7$ ja $L_{re}ALS_8$. Tähtis on veel välja tuua, et kuuskede L_{re} arvutamiseks kasutatud algne mudel sisaldab liiget H_{100} ja kaskede oma mitte. See võib põhjustada varasemalt mudelite valideerimise jooniste kirjeldamisel mainitud visuaalse puuliigi põhise erisuse. Erinevus võib olla põhjustatud ka hoopis sellest, et ühel juhul on liige H_{100} kasutuses juba L_{re} arvutamisel ja teisel juhul mitte.

Olemasolevate, tavapärastel takseerandmetel põhinevate mudelite sisendparameetrite kombineerimine ALS andmetega on levinud moodus harvendusraie planeerimiseks vajalike takseertunnuste hindamiseks. Watt *et al.* (2013) koostasid sellel põhimõttel uurimuse 9-17 aastase ebatsuuga (*Pseudotsuga menziesii* Mirb.) istanduse harvenduse

planeerimiseks. Töö käigus modelleeriti ALS ja takseerandmete põhjal puu kõrgus, rinnaspindala, maht, rinnasdiameeter, võrastiku alguse kõrgus ning puistu tihedus. Tulemustena arvestati õnnestunuks kõik mudelid peale puistu tiheduse mudeli, mille R^2 oli 0,55 ja RMSE 355 puud/ha.

Watt *et al* (2013). töös kasutatud puistu tiheduse arvutamise mudel

$$\rho = 2986 - 314,9 \cdot Elev\ IQ - 22,94 \cdot PC_{zero} - 64,26 \cdot Vanus \quad (24)$$

kus ρ on puistu tihedus puud/ha;

Elev IQ (*Elevation interquartile*) - kõrgusekvartiilide (25- ja 75-kvartiil) vahe m;

PC_{zero} (*Percentage*) – peegelduste protsent, kuni 0,5 kõrguseni;

Vanus – vanus aastates.

Käesolevas töös prognoositi tiheduse pöördväärtust ehk hõredust, millest väiksema korral vajab puistu harvendamist ja saadi mudelite R^2 vahemikus 0,68-0,72 ja harvendusraie-eelse kriitilise hõreduse ruutviga valideerimisandmestiku põhjal vahemikus 0,37-0,44 m. Keskmise hõredus valideerimisandmestikus oli ~3 m, mille puhul esindab 0,4 m (mudelite ruutvigade keskmine) kõikumine lähtuvalt hõreduse valemist (valem 4) 375 või 250 puud/ha, sõltuvalt sellest kas hõredus kasvab või kahaneb. Seega puude arvu osas on tulemus üsna sarnane, kuid korrelatsioonikordaja on käesolevas töös parem. Võib veel välja tuua selle, et Watt *et al.* (2013) koostatud mudelis ei kasutatud otseselt ühtegi sama liiget, mida käesolevas töös tehtud mudelites, kuid saadi osaliselt sarnane tulemus.

Puistu harvendusraie küpsust on ALS andmetel hinnatud ka logistilise regressiooni ja k-MSN (Maltamo *et al.* 2006) meetodiga. Vastaranta *et al.* (2011) uurimuses tehti 381 proovitükki, millel hinnati puuliik, rinnasdiameeter ja kõrgus ning nende abil harvendusraie vajaduse hinnang. Modelleerimisel oli prognoositavaks tunnuseks binaarne harvendusraie vajadus ning prognoosi tulemus loeti üheks, kui see oli üle 0,5. Tõenäosust hinnati kahel juhul: 1) puistu vajab harvendust lähima 10 aasta jooksul või 2) puistu vajab harvendust niipea kui võimalik. Esimesel juhul kasutati modelleerimisel ALS andmetest kõrgusjaotuse protsentiili maksimumi, keskvaartust ning mitmeid teisi kõrgusjaotuse protsentiile vahemikus H_{P20} - H_{P70} . Teisel juhul oli kasutusel H_{P90} ja kogu peegelduste ning

ainult vegetatsioonilt pärit peegelduste suhtarv. Kõrguse protsentiile kasutati ka käesolevas töös. Tulemusteks saadi logistilises regressioonis ALS andmete puhul vastavalt 1) punktile 79% ja 2) 83%. Klassikalisi takseerandmeid kasutava mudeli puhul olid samad näitajad vastavalt 66% ja 83%, k-MSN meetodi puhul vastavalt 70% ja 86%. Välja toodud protsendid näitavad erinevate meetodite prognoosimise täpsust puistu harvendusraie küpsuse hindamisel ning võimaldavad neid omavahel võrrelda. Tööst võib järeldada, et mitteparameetrilised testid on üheks võimalikuks alternatiiviks, kui varasemal hindamisel on harvenduse vajadus juba teada (Eskelson *et al.* 2009). Vastaranta *et al.* (2011) uurimuses kirjeldatud meetodi puhul on tegemist hea alternatiivse võimalusega kasutada ALS andmeid harvendusraie vajaduse hindamiseks.

Selleks, et käesolevas töös saadud mudelite hulgast parimad edaspidiseks arendamiseks välja valida oleks tarvis teha testimine andmestikul, kus on taksaatori poolt määratud harvendusraie vajadus takseertunnusena kirjas. Takseerandmetele tuginev mudel (Korjus 1999), mida kohandati ALS andmete jaoks, annab küll teoreetilise harvendusraie-eelse hõreduse, aga selle mudeli puhul on tegemist pigem administratiivse normatiiviga, mida pole kahjuks edasi arendatud. Käesolevas töös tehtud valideerimine näitab küll seost takseerandmetel baseeruva mudeliga, kuid ei peegelda siiski saajaprotsendiliselt mudelites kasutatud liikmete seoseid metsa struktuurielementidega. See oleks käesoleva töö edasiarenduse järgmine samm, sest võimaldaks vaadelda mudeleid konkreetselt puistute kohta kohapeal saadud harvendamise vajaduse hinnanguga ja selle kaudu teha täpsemaid otsuseid harvendusraie vajaduse kohta kasutades aerolidari andmeid.

Praktiliselt on võimalik mudeleid (pärast taksaatori harvenduse hinnanguga valideerimist) suunistena kasutada, kuid oleks tarvis vabaneda liikmest L , mis võimaldaks raie-eelse hõreduse asemel arvutada juba konkreetselt harvendusraie vajaduse ($L-L_{re}$) ainult lidariandmete põhjal korraga suurtele metsamassiividele. Üks võimalus selleks oleks katsetada L_{re} mudeleid nii, et prognoositavaks tunnuseks on $L-L_{re}$, ning modelleerimise ülesehitus oleks sarnane eelnevalt kirjeldatud Vastaranta *et al.* (2011) uurimuse metoodikale, kus hinnati puistu harvendusraie küpsust. Prognoositav tunnus $L-L_{re}$ tuleks teha binaarseks näiteks nii, et $L < L_{re}$ on 1 ning $L > L_{re}$ on 0 ja pärast seda kasutada modelleerimisel logistilist regressiooni, mida kasutatakse sündmuste tõenäosuste uurimisel sagedasti (Vastaranta *et al.* 2011). Sellisel viisil leitud mudelid ei vaja enam edasist tõlgendust läbi teatud takseertunnuste (käesolevas töös L) vaid annavad puistu

harvendusraie vajaduse kohta sisuliselt „jah/ei“ vastuse. H_{100} võib mudelisse alles jääda, sest tegemist on üsna stabiilse tunnusega, mida on võimalik kergesti leida mullakaardilt või varasematest takseerandmetest.

Kokkuvõte

Käesolevas töös uuriti harvendusraie vajaduse hindamist ALS andmetel Laeva katsealal. Selleks prooviti puistu L_{re} mudelis (valemid 5-7) asendada D ALS andmetega, kasutades H ja D seost (Padari 1999). Eesmärgi saavutamiseks töödeldi esmalt 2013. aastal Maa-Ameti poolt kogutud lidariandmeid nii, et saadi iga katsealal oleva eraldise kohta kõrgusandmetega punktipilv. Servaefekti vältimiseks puhverdati eraldiste servad 10 m sissepoole. Teiseks ülesandeks oli eraldada metsaregistri andmestikust need eraldised, mis kuuluvad parameetrite (vanus, diameeter, boniteet) poolest puistute hulka, kuhu võidakse kavandada harvendusraiet. Saadud eraldistele arvutati takseertunnused H_{100} , G, N, L ja L_{re} . Pärast seda koostati glm mudelid, mis prognoosisid tunnust L_{re} , kasutades prognoosivate tunnustena ALS andmeid ja H_{100} , mis oli ainus metsaregistri andmestikust kasutatud tunnus.

Katsetamise tulemusena saadi 14 headuselt võrdset mudelit. Saadud mudelid valideeriti, uurides L_{re} ja $L_{re}ALS$ seoseid Laeva katsealal olevate, potentsiaalselt harvendust vajavate eraldiste andmestiku põhjal. Valideerimisandmestik oli mudelite loomise andmestikust sõltumatu. Tulemustest võib välja lugeda, et käesolevas töös koostatud ALS andmetega mudelid kirjeldavad harvendamise vajadust võrreldes tavapäraseid takseertunnuseid kasutava mudeliga üsna sarnaselt. Kontrollides mudelite liikmete suhteid puistu hõredusega tõusis teistega võrreldes esile H_{SD} . See võib olla põhjustatud sellest, et see parameeter kirjeldab kõrguste varieeruvust puistus, mis on suurem tihedates puistutes, kuna seal kasvab palju erineva kõrgusega puid, hõredamad puistud on seevastu homogeensemad. Seda arvesse võttes võiks mudelite edasisel käsitlemisel esmalt kasutada mudeleid $L_{re}ALS_7$ ja $L_{re}ALS_8$.

Mudelite praktiliseks rakendamiseks tehti graafikud, kus toodi esile eraldised, mis vajaksid harvendusraie planeerimisel esimesena tähelepanu. Graafikute tegemisel lahutati puistu metsaregistri andmete põhjal arvutatud hõredusest mudelitega arvutatud raie-eelne hõredus. Kui vahe oli negatiivne, tähendas see seda, et puistu on liiga tihe ning vajaks harvendust. Graafikud tehti metsaregistri andmeid kasutava mudeli ja käesolevas töös

koostatud ALS andmeid kasutavate mudelite seostena ja negatiivsed tulemused eraldati joonisel musta kriipsjoonega.

Käesoleva töö edasi arendamiseks oleks järgmine samm tulemuste valideerimine andmestikul, mis sisaldab taksaatori poolt tehtud harvendusraie vajaduse hinnangut. See võimaldaks teha kindlaid väiteid mudelite headuse kohta ning loodetavasti tõsta esile veel mõned paremad mudelid. Lisaks sellele tuleks statistilise testiga uurida võimalikku puuliigi mõju valideerimise seoses. Pärast seda oleks võimalik ette võtta liikme L asendamine ALS andmetega, et võimaldada harvenduse vajaduse hindamist ainult ALS andmete põhjal. L asendamiseks võiks kasutada L_{re} mudelites prognoositava tunnuseks $L-L_{re}$ seost.

KASUTATUD KIRJANDUS

Aastaraamat mets 2016. (2016). Keskkonnaagentuur.

http://www.keskkonnaagentuur.ee/sites/default/files/mets2016_08.09.pdf (15.11.2017)

Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. (2018). Maa-Amet. [veebileht]

<https://geoportaal.maaamet.ee/est/Andmed-ja-kaardid/Topograafilised-andmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html> (16.05.2018)

Andersen, H. E., Reutebuch, S. E., MacGaughey, R. J. (2006). Chapter 3: Active remote sensing. - *Computer Applications in Sustainable Forest Management*. pp. 42-66.

Arumäe, T., Lang, M. (2016). Aerolidarilt puistu tüvemahu hindamise mudelid ning võrdlus takseeritud tagavaraga. - *Metsanduslikud Uurimused*. Nr 64, lk 5–16.

Baltsavias, E. P. (1999). Airborne Laser Scanning: Basic relations and formulas. - *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 54, pp. 47-56.

Charlton, M. E., Large, A. R. G., Fuller, I. C. (2003). Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland UK. - *Earth Surface Processes and Landforms*. Vol. 28, pp. 299-306.

Eskelson, B., Temesgen, H., Lemay, V., Barrett, T., Crookston, N., Hudak, A. (2009). The roles of nearest neighbor methods in imputing missing data in forest inventory and monitoring databases. - *Scandinavian Journal of Forest Research*. Vol. 24, pp. 235-246.

Heritage, G. L., Large, A. R. G. (2009). Principles of 3D Laser Scanning. - Heritage, G. L., Large, A. R. G. *Laser Scanning for Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex. pp. 21-34.

Hooldusraiete normatiivid: (harvendusaste, järjekord, sortimendid). (1980). /Koost. E. Tappo. Toim. K. Saveljeva. Tallinn: EMI, Majandusliku Uurimise Laboratoorium, Eesti Metsakorralduskeskus. 47 lk.

Katzenbeisser, R. (2003). About the calibration of LiDAR sensors. *Proceedings ISPRS workshop on 3-D reconstruction from airborne laser-scanner and InSAR data*, 8-10 October 2003, Dresden, Germany.

Korjus, H. (1999). Hooldusraiete mudelitest. – *Pidev metsakorraldus. EPMÜ Metsateaduskonna toimetised*. Nr 32, lk 44-49.

Laas, E., Uri, V., Valgepea, M. 2011. Metsamajanduse alused. - Tartu: Tartu Ülikooli Kirjastus. 862 lk.

- Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J.** (2012). Lennukilidari ja spektraalse kaugseireandmestiku kasutamine metsa peamiste takseertunnuste hindamiseks Aegviidu katsealal. - *Metsanduslikud uurimused*. Nr 56, lk 27-41.
- Lang, M., Arumäe, T., Lükk, T., Sims, A.** (2014). Puistute liigilise koosseisu ja tüvemahu hindamine k-lähima naabri meetodil mitmerindelistes majandatavates segametsades. - *Metsanduslikud Uurimused*. Nr 61, lk 47-68.
- Large, A. R. G., Heritage, G. L.** (2009). Laser Scanning-Evolution of the Discipline. - Heritage, G. L., Large, A. R. G. *Laser Scanning for Environmental Sciences*. John Wiley & Sons, Ltd., Publication, West Sussex. pp.1-20.
- Leica. (2007). Airborne Laser Scanner Product Specifications (760344en – V.07 – INT). Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland. pp. 12.[on-line, toote spetsifikatsioonid] <http://www.nts-info.com/inventory/images/ALS50-II.Ref.703.pdf> (16.05.2018)
- Maltamo, M., Malinen, J., Packale'n, P., Suvanto, A. & Kangas, J.** (2006). Nonparametric estimation of stem volume using airborne laser scanning, aerial photography, and standregister data. - *Canadian Journal of Forest Research*. Vol. 36, pp. 426-436.
- McGaughey, R.J.** (2014). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. March 2014 – FUSION Version 3.60. United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station.
- Metsa korraldamise juhend. (vastu võetud 16.01.2009, viimati jõustunud 25.02.2017). – *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/122022017011> (15.04.2018)
- Metsa majandamise eeskiri. (vastu võetud 27.12.2006, viimati jõustunud 18.12.2017). – *Riigi teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/115122017017> (02.12.2017)
- Metsaressursi arvestuse riikliku registri põhimäärus. (vastu võetud 16.08.2007, viimati jõustunud 01.09.2017, kehtetu). – *Riigi Teataja* <https://www.riigiteataja.ee/akt/105092017005> (02.05.2018)
- Padari, A.** (1999). Kasvava metsa hindamisest: Sortimendid ja rikked. - *Pidev metsakorraldus*. EPMÜ Metsateaduskonna toimetised. Nr 32, lk 37-43.
- Price, W. F., Uren, J.** (1989). Laser Surveying. - London: Van Nostrand Reinhold International.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Viitala, R.** (2011). Predicting stand-thinning maturity from airborne laser scanning data. - *Scandinavian Journal of Forest Research*. Vol. 26, No. 2, pp. 187-196.
- Vaus, M.** (2005). Metsatakseerimine. Tartu: OÜ Greif. 178 lk.
- Watt, M.,S., Meredith, A., Watt, P., Gunn, A.** (2013). Use of LiDAR to estimate stand characteristics for thinning operations in young Douglas-fir plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*. Vol. 43, No. 18.

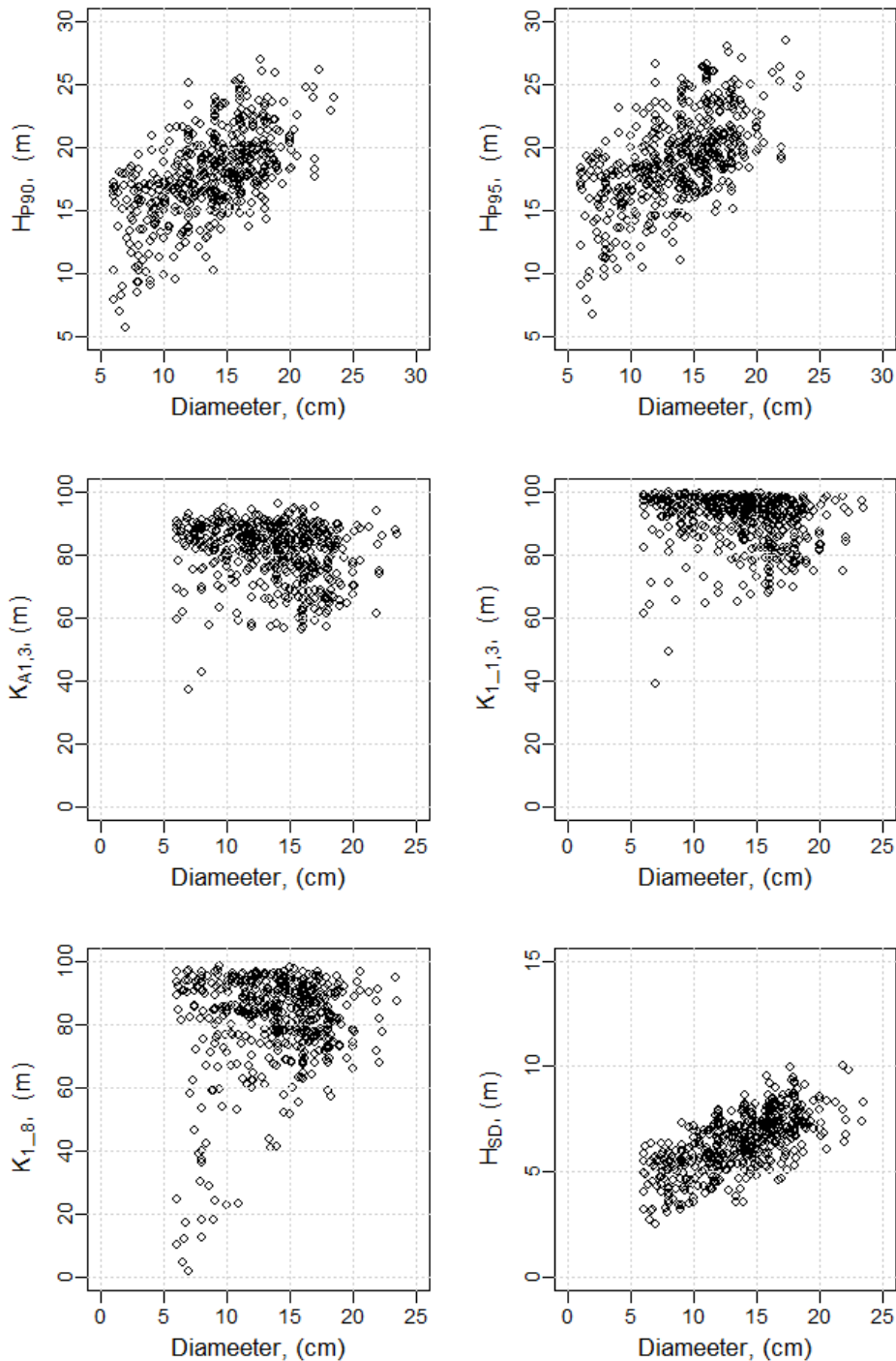
LISAD

Lisa 1. Mudelite parameetrite tõlgendamist lihtsustav tabel

Mudel	a_0	H_{100}	$K_{A1,3}$	$K_{1\ 1,3}$	K_{1-8}	H_{P90}	H_{P95}	H_{SD}	$K_{A1,3} \times H_{P90}$	$H_{P90} \times K_{1\ 1,3}$	$K_{A1,3} \times K_{1\ 1,3}$	$H_{100} \times K_{A1,3} \times H_{P90}$	$K_{A1,3} \times H_{P90} \times K_{1\ 1,3}$	$K_{A1,3} \times K_{1\ 1,3} \times H_{SD}$
1	-1,813	0,0509	0,0146					0,279						
2	-1,261	0,0515	0,0420	-0,0313				0,291						
3	-0,571	0,0504			-0,00565	0,123								
4	-1,334	0,0510		0,0104	-0,00614	0,0697		0,140						
5	-2,087	0,0509	0,0208		-0,00536			0,311						
6	-0,530	0,0511	-0,00329			0,109								
7	-0,756	0,0504				0,0830		0,0684						
8	-0,906	0,0684				0,104								
9	-0,496	0,0515		-0,00428			0,106							
10	-0,339	0,0526	0,0132	-0,0181			0,107							
11	3,666	-3,42E-02	-6,82E-02						4,69E-03	-2,31E-03	4,72E-04	6,28E-05	-3,78E-05	2,92E-05
12	1,652	-3,54E-02							2,51E-03	-8,66E-04		6,32E-05	-2,85E-05	2,04E-05
13	1,577	-3,57E-02							2,13E-03			6,25E-05	-2,70E-05	
14	1,38	-2,51E-02				1,89E-01				-3,27E-03		5,63E-05		3,43E-05

a_0 – vabaliige; H_{100} – kõrgusindeks; $K_{A1,3}$ – kõigi peegelduste katvuse hinnang 1,3 m kõrguselt; K_{1-8} – esimeste peegelduste katvuse hinnang 8 m kõrguselt; H_{P90} – kõrgusjaotuse 90-protsentiil; H_{P95} – kõrgusjaotuse 95-protsentiil; H_{SD} – kõrguse standardhälve

Lisa 2. Puistute keskmise diameetri seosed mudelites kasutatud parameetritega



H_{p90} – kõrgusjaotuse 90-protsentiil; H_{p95} – kõrgusjaotuse 95-protsentiil; $K_{A1,3}$ – kõigi peegelduste katvuse hinnang 1,3 m kõrguselt; $K_{1,1,3}$ – esimeste peegelduste katvuse hinnang 1,3 m kõrguselt; $K_{1,8}$ – esimeste peegelduste katvuse hinnang 8 m kõrguselt; H_{SD} – kõrguse standardhälve

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks
ning juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Martin Kõks,

(sünniaeg pp/kuu/aa 08.10.1992)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö
„Harvendusraie vajaduse hindamine aerolidari andmetel Laeva katsealal“,

mille juhendajad on Tauri Arumäe ja Mait Lang,

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
- 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
- 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
allkiri

Tartu, _____
kuupäev

Juhendajate kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)